

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Ina Chalupková

## Zkoumání vlastností kalorimetru pro experiment ATLAS v CERN

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Tomáš Davídek, Ph.D.

Studijní program: Obecná fyzika

2008

Chcela by som poďakovať dr. Tomáši Davidkovi za vedenie práce, podnetné rady a trpezlivú pomoc.

Ďakujem aj všetkým, ktorí mi akýmkoľvek spôsobom pomohli, hlavne Ivanovi Klimekovi a Tomášovi Korenkovi za ich trpezlivosť s mojimi programátorskými pokusmi.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 29.5.2008

Ina Chalupková

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>1 Experiment ATLAS</b>	<b>6</b>
1.1 Urýchľovač LHC . . . . .	6
1.2 Detektor ATLAS . . . . .	7
1.2.1 Stavba . . . . .	7
1.2.2 Hadrónový kalorimeter TileCal . . . . .	10
<b>2 Meranie energie</b>	<b>11</b>
2.1 Kalorimeter . . . . .	11
2.2 Tvorba spŕšiek . . . . .	12
2.3 Nekompensovateľnosť hadrónového kalorimetra . . . . .	13
2.4 Parametre kalorimetra . . . . .	14
2.4.1 Linearita . . . . .	14
2.4.2 Energetické rozlíšenie . . . . .	14
<b>3 Vyhodnotenie parametrov detektora TileCal zo simulácií</b>	<b>16</b>
3.1 Programy na simuláciu a analýzu . . . . .	16
3.2 Energetické spektrum . . . . .	17
3.2.1 Mióny . . . . .	19
3.3 Parametre kalorimetra . . . . .	21
3.3.1 Linearita . . . . .	21
3.3.2 Energetické rozlíšenie . . . . .	21
<b>Záver</b>	<b>23</b>
<b>Literatúra</b>	<b>24</b>

Název práce: Zkoumání vlastností kalorimetru pro experiment ATLAS v CERN  
Autor: Ina Chalupková  
Katedra (ústav): Ústav částicové a jaderné fyziky  
Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Tomáš Davídek, Ph.D.  
e-mail vedoucího: Tomas.Davidek@mff.cuni.cz

Abstrakt: V práci je stručně popsán detektor ATLAS v CERNu a jeden z jeho subdetektorů – kalorimetr TileCal.

Po uvedení do problematiky kalorimetrie je vysvětlen rozvoj spršek a problém nekompensovatelnosti hadronového kalorimetru, který souvisí s podílem elektromagnetické a hadronové komponenty rozvoje. Je definovaná linearita a energetické rozšíření jako dva z jeho základních parametrů.

V poslední části jsou tyto parametry pomocí programu ROOT vyhodnocené ze simulací interakce nabitých pionů s kalorimentrem a porovnané s dosavadními experimentálními závěry.

Klíčová slova: ATLAS, kalorimetr, TileCal, energetické rozlišení, nekompensovatelnost

Title: Study of the calorimeter for ATLAS experiment at CERN  
Author: Ina Chalupková  
Department: Institute of Particle and Nuclear Physics  
Supervisor: RNDr. Tomáš Davídek, Ph.D.  
Supervisor's e-mail address: Tomas.Davidek@mff.cuni.cz

Abstract: This thesis in its first part briefly explains the CERN ATLAS detector and one of its sub-detectors – calorimeter TileCal.

After introducing to the calorimetry problematics, are the shower development and the non-compensation of the hadron calorimeter related to the ratio of electromagnetic and hadronic component of development ( $e/h$ ), explained. The linearity and energy resolution are defined as two calorimeter basis parameters.

In the last part are these parameters evaluated using ROOT analysis of simulated interactions of charged pions with calorimeter and compared with the results of current day experimental theories.

Keywords: ATLAS, calorimeter, TileCal, energy resolution, non-compensation

# Úvod

V súčasnej dobe je pre popis mikrosвета všeobecne uznávaný tzv. štandardný model, ktorý spája tri zo štyroch známych typov interakcií elementárnych častíc. Zjednocuje teóriu elektroslabých interakcií a kvantovú chromodynamiku, pričom je konzistentný so špeciálnou teóriou relativity. Všetky jeho predpovede súhlasia s experimentálnymi výsledkami s veľkou presnosťou, zatiaľ v ňom však nie je zahrnutý popis gravitácie ako štvrtej interakcie. Ďalším nedostatkom je to, že obsahuje veľký počet voľných parametrov, ktoré nie je možné určiť teoreticky a že zatiaľ nebola pozorovaná častica, ktorú model predpovedá - tzv. Higgsov bozón.

Overenie či upresnenie štandardného modelu sa očakáva od experimentov na LHC. Tento urýchľovač je súčasťou strediska CERN neďaleko Ženevy a ním urýchlené častice sa budú používať v štyroch experimentoch. Hlavnými úlohami je hľadanie Higgsovho bozónu, skúmanie fyziky ťažkých kvarkov, existencie kvark-gluónovej plazmy, prípadne ďalších teórií za štandardným modelom (supersymetrické častice, teória strún).

Úlohou detektora ATLAS bude s čo najväčšou presnosťou zmerať vlastnosti častíc produkovaných v zrážkach, ich energiu, hybnosť, náboj a pod. Energia sa bude merať kalorimetrami, jedným z nich je hadrónový TileCal.

Aby bolo možné z experimentálnych dát určiť energiu častíc, je potrebné poznať mechanizmus interakcie častíc s látkou, vytvoriť simulácie prechodu častíc kalorimetrom a potom ich porovnať s údajmi získanými z testovacích meraní na prototypu časti zariadenia. Cieľom tejto práce je analýza simulácií vytvorených metódou Monte Carlo, vyhodnotenie niektorých parametrov detektora (linearita, energetické rozlíšenie) a ich porovnanie s výsledkami testovacieho modulu.

# Kapitola 1

## Experiment ATLAS

### 1.1 Urýchľovač LHC

LHC (*Large Hadron Collider*) je kruhový urýchľovač častíc, ktorý sa nachádza v Európskom laboratóriu pre časticovú fyziku (CERN, *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) na hraniciach Francúzska a Švajčiarska neďaleko Ženevy. Je inštalovaný v hĺbke 50 až 175 metrov v kruhovom tuneli s obvodom 26,66 km využívanom v rokoch 1989 až 2000 urýchľovačom LEP (*Large Electron-Positron Collider*). Urýchľovač bude pracovať s protibežnými zväzkami protónov s energiami 7 TeV a ťažkých iónov (olova) s energiou 574 TeV na jedno jadro, luminozita<sup>1</sup>  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  pre protóny a  $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  pre olovo (údaje z [1]).

Častice sa budú zrážať na 4 miestach a zaznamenávať v detektoroch umiestnených po obvode prstenca. Dva z nich, ATLAS (*A Toroidal LHC Apparatus*) a CMS (*Compact Muon Solenoid*) patria medzi veľké viacúčelové detektory, experimenty na ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) budú zamerané na štúdium vlastností kvark-gluónovej plazmy pri zrážkach ťažkých iontov, LHCb (*LHC beauty*) bude zamerané na rozdiely medzi hmotou a antihmotou v interakciách  $b$  kvarku.

Ďalšie informácie o CERNe a jednotlivých experimentoch sú na webových stránkach tejto organizácie [2].

---

<sup>1</sup>Luminozita udáva počet častíc prechádzajúcich jednotkou plochy za jednotku času.

## 1.2 Detektor ATLAS

ATLAS je jeden z dvoch viacúčelových detektorov na LHC. Bude s veľkou presnosťou identifikovať častice vznikajúce v zrážkach, zaznamenávať ich trajektórie, merať energiu, hybnosť a náboj. Tieto dáta budú následne použité na rekonštrukciu celého procesu.

Vysoká energia a luminozita LHC poskytuje širokú škálu možností meraní na ATLASe, od presnejšieho určenia vlastností už známych častíc až po nové objavy za hranicami dnešnej fyziky vysokých energií. Medzi hlavné výskumné zámery definované vo viacerých dokumentoch (napr. [3], [4]) patrí skúmanie pôvodu hmôt častíc, čo vedie ku hľadaniu Higgsovho bozónu (v prípade platnosti štandardného modelu). ATLAS musí naň byť citlivý na celej škále teoreticky možných hmotností. Na jeho zaznamenanie je potrebné vysoké rozlíšenie v meraniach energií *jetov*<sup>2</sup>, elektrónov, fotónov a miónov, určenie sekundárnych vrcholov rozpadov  $\tau$  leptónov a  $b$  kvarku a chýbajúcej pričnej hybnosti.

Ďalší dôležitý cieľ je výskum javov spojených s narušením symetrií v prírode, napríklad  $CP$  porušenie v rozpadoch  $B$  mezónov, hľadanie častíc predpovedaných teóriami supersymetrie alebo Technicolour, nových kalibračných bozónov a zložených kvarkov a leptónov.

Potreba obsiahnuť toto veľké spektrum fyzikálnych dejov viedla k optimalizácii stavby detektora ATLAS.

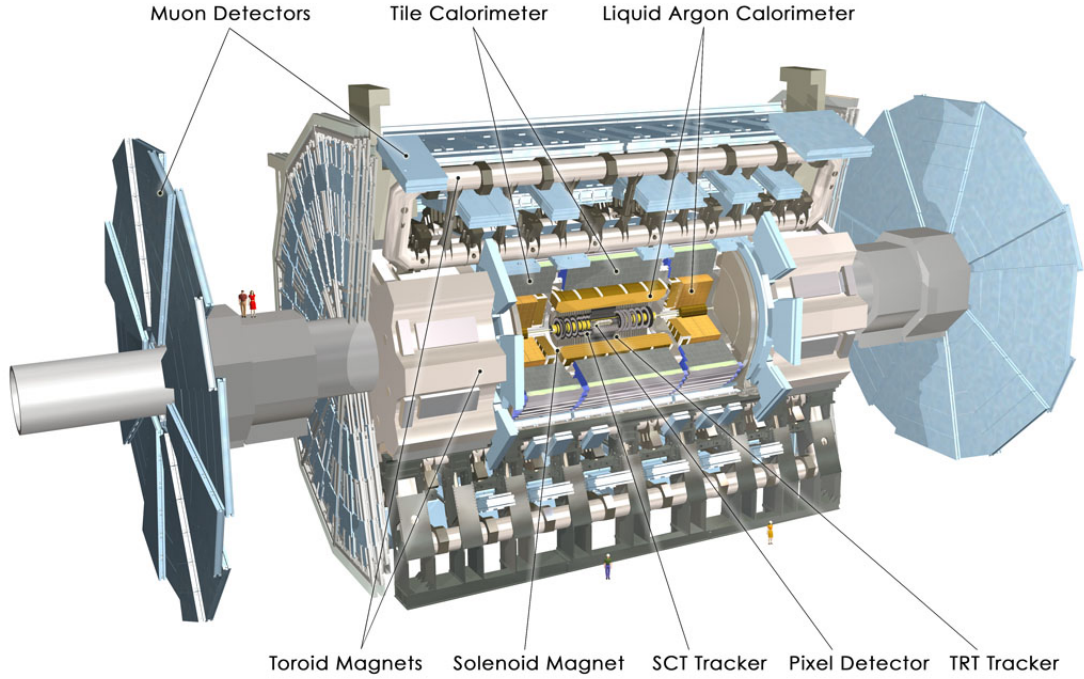
### 1.2.1 Stavba

Celý detektorový systém je cylindricky symetrický okolo osi, ktorá prechádza zväzkom častíc urýchľovaných LHC. Má výšku 25 metrov, dĺžku 46 metrov a váži približne 7 000 ton. Pre čo najpresnejšie merania všetkých vlastností častíc vo veľkom rozsahu hodnôt je zložený z viacerých subdetektorov, pričom sú v nich použité rôzne detekčné metódy.

Na obrázku 1.1 (prevzaté z [1]) je načrtnuté umiestnenie jednotlivých častí de-

---

<sup>2</sup>*Jet* je úzky kužeľ hadrónov a iných častíc, ktoré vznikajú hadronizáciou kvarkov alebo gluónov v zrážke.



**Obrázek 1.1:** Stavba detektora ATLAS

tektora. Nablížšie k interakčnému vrcholu sa nachádza vnútorný detektor (tzv. *tracker*) s polomerom 1,2 metra, ktorého úlohou je určiť trajektórie častíc s pseudorapiditou<sup>3</sup>  $|\eta| < 2,5$ , prípadne sekundárne interakčné vrcholy, s veľkou presnosťou. Je umiestnený v solenoide s pozdĺžnym magnetickým poľom s  $B = 2$  T, aby bolo zo zakrivenia dráh nabitých častíc možné určiť ich hybnosť. Skladá sa z polovodičového pixelového (*Pixel Detector*), stripového detektora (SCT - *Semiconductor Tracker*) a z detektora prechodového žiarenia (TRT - *Transition Radiation Tracker*). Má typické usporiadanie, v ktorom sú po oboch stranách hlavného modulu tvaru valca (*barrel*) umiestnené koncové disky (*end-cap* alebo *forward*). Táto štruktúra je typická aj pre ostatné subdetektory ATLASu.

<sup>3</sup>Pseudorapidita, veličina udávajúca smer častice vylietavajúcej z interakčného vrcholu, je definovaná vzťahom

$$\eta = -\ln \tan \frac{\vartheta}{2},$$

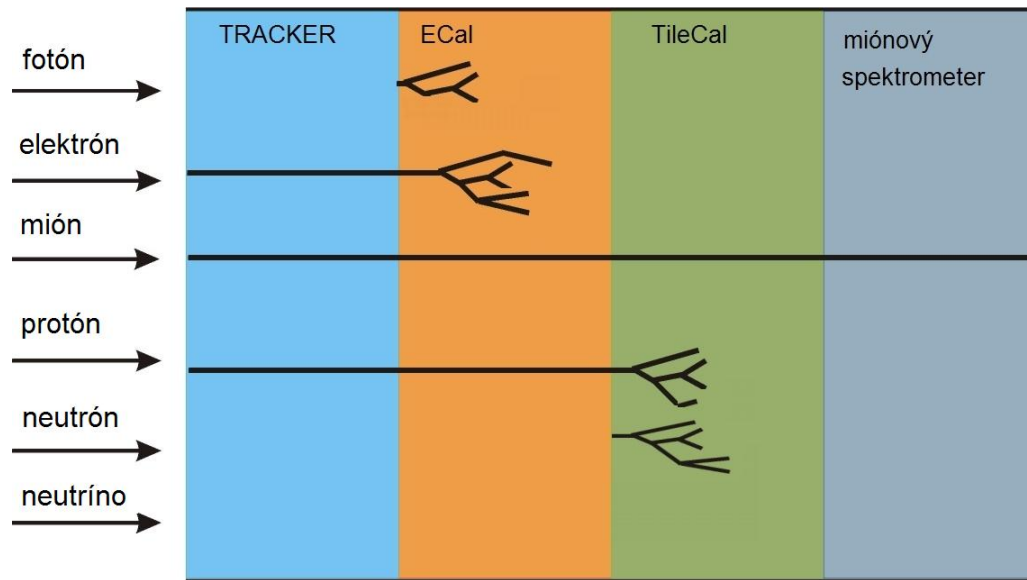
kde  $\vartheta$  je uhol, ktorý zvierá vektor rýchlosti častice s pôvodným smerom zväzku.



Z vnútorného detektora častice pokračujú do kalorimetrov - elektromagnetického a niektoré z nich ďalej do hadrónového kalorimetra, oba patria medzi zložené kalorimetre (tzv. *sampling*). Elektromagnetický kalorimeter (*Liquid Argon Calorimeter*) využíva ako aktívne prostredie tekutý argón a ako absorbátor olovo. Priebeh interakcií v kalorimetroch je opísaný v podkapitole 2.2 a stavba hadrónového kalorimetra TileCal je popísaná v nasledujúcej časti.

Mióny, ktoré nie sú pohltené v kalorimetroch, pretože účinný prierez ich elektromagnetickej interakcie s jadrami je veľmi malý, sú detekované v poslednom detektore - mionovom spektrometri. Jeho úlohou je premerať hybnosť a náboj miónov presnejšie ako vo vnútornom detektore, používajú sa na to driftové proporcionálne komory. Silné magnetické pole ( $B = 4 \text{ T}$ ), ktoré je k tomu potrebné, vytvára osem veľkých supravodivých magnetov.

Prechod rôznych častíc subdetektormi je schematicky naznačený na obrázku 1.2. Z neho je zjavné, aké odozvy budú dávať jednotlivé subdetektory na určité druhy častíc a ako bude prebiehať ich identifikácia.

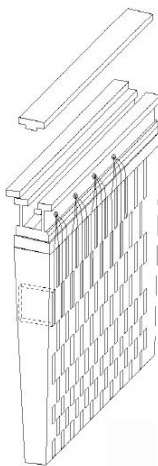


**Obrázek 1.2:** Prechod rôznych častíc subdetektormi

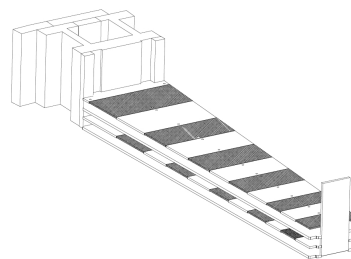
### 1.2.2 Hadrónový kalorimeter TileCal

Hadronový kalorimeter *Tile Calorimeter* (*TileCal*) používa oceľ ako absorbátor a scintilačné doštičky čítané optickými vláknami s posuvom vlnovej dĺžky (*wavelength shifting*, WLS) ako aktívne médium. Celá konštrukcia má valcový tvar s vnútorným polomerom 2280 mm a vonkajším polomerom 4230 mm. Je rozdelená na 5640 mm dlhú centrálnu časť (*barrel*) a dva okrajové moduly 2910 mm (*extended barrel*).

V rovine kolmej na zväzok je *barrel* zložený zo 64 rovnakých modulov (obrázok 1.3), každý z nich je pozdĺžne rozdelený na 311 periód (obrázok 1.4). Períodu tvoria dve železné nosné platne hrúbky 5 mm, na ktorých sú striedavo prilepené železné platničky hrubé 4 mm a scintilačné doštičky s hrúbkou 3 mm obalené difúznou fóliou. Optické WLS vlákna smerujúce v radiálnom smere zbierajú svetlo z doštičiek pozdĺž ich dvoch otvorených hrán a vedú ho ďalej do fotonásobičov. Podľa fotonásobičov bude kalorimeter rozdelený na cely, konkrétne vnútorný barrel sa delí na 45 cel.



Obrázek 1.3: Modul TileCalu



Obrázek 1.4: Perióda modulu

# Kapitola 2

## Meranie energie

### 2.1 Kalorimeter

Kalorimeter je zariadenie na meranie energie častice, ktorá ním preletela. Meraťelný signál sa vytvára viacerými mechanizmami, napr. ionizáciou, scintilačným alebo Čerenkovovým žiarením, ktoré vznikajú v závislosti na type použitého aktívneho média a častice.

Vo všeobecnosti môžeme kalorimetre podľa štruktúry rozdeliť na homogénne a zložené. Homogénny kalorimeter je tvorený aktívnym prostredím, z ktorého sa získava signál. Zložený kalorimeter sa skladá z aktívneho prostredia a z pasívnych častí, tie prelietavajúcu časticu spomalia a jej energiu rozdelia medzi viac sekundárnych častíc. Tento postup je vhodný hlavne v prípade vysokoenergetických častíc.

Podľa typu častíc detekovaných kalorimetrami ich delíme na elektromagnetické a hadrónové. Elektromagnetický kalorimeter je konštruovaný z takých materiálov, aby v ňom interagovali hlavne elektróny, pozitrony a fotóny, jeho typická dĺžka je 30 radiačných dĺžok.

Oproti trekovým detektorom (určujú polohu častice), rozlíšenie ktorých klesá so zvyšujúcou sa energiou, sa rozlíšenie kalorimetra naopak s rastúcou energiou zlepšuje, ako bude ukázané v podkapitole 2.4.2. Kalorimeter je navyše citlivý aj na neutrálne častice a pri dostatočnej hrúbke pohltí väčšinu častíc.

## 2.2 Tvorba spršiek

Častice ako elektróny, pozitrony a fotóny vytvárajú v kalorimetri elektromagnetické spršky. Elektróny pri prechode prostredím vyžarujú fotóny brzdného žiarenia, ktoré vytvoria elektrón-pozitronový pár, ak na to majú dostatočnú energiu. Podobne je to v prípade pozitronov. Pri menších energiách fotónov nastáva Comptonov rozptyl a fotoefekt, čím sa vytvára veľké množstvo voľných elektrónov. Keď sa energia jednotlivých častíc v sprške zmenší natoľko, že prevládajú ionizačné straty, rozvoj sa zastaví. Častice, ktoré sa nachádzajú v pasívnom médiu sú väčšinou pohltené, zatiaľ čo z aktívneho média sa získa merateľný signál.

Sprška je charakterizovaná radiálnou dĺžkou  $X_0$ , ktorá v zjednodušenom modeli udáva vzdialenosť, ktorú častica preletí medzi interakciami.

Elektromagnetické spršky sú spravidla úzke a majú malé fluktuácie v množstve nameranej energie. Linearita signálu (závislosť nameranej energie od pôvodnej) a energetické rozlíšenie sú veľmi dobré.

Mechanizmus tvorby spršky hadrónmi je zložitejší ako v predchádzajúcom prípade. Interagujú totiž s jadrami materiálu silnou interakciou, pri ktorej vzniká veľké množstvo hadrónov (protónov, neutrónov, piónov, hyperónov), pričom priamu produkciu elektromagnetických častíc môžeme zanedbať. Vlastnosti spršky sa popisujú pomocou interakčnej dĺžky  $\lambda_I$ , ktorá však závisí nielen na materiáloch kalorimetra, ale aj na type častice.

Pri interakcii vznikajú aj rôzne štiepne produkty, takže energia sa čiastočne spotrebuje na väzbovú energiu, ďalšiu energiu odnášajú neutrína a mióny, ktoré sú ťažko merateľné. Z toho vyplýva rozdiel v signáloch od elektrónu a hadrónu s rovnakou energiou, veľké fluktuácie v nameranej energii podľa podielu elektromagnetickej komponenty spršky a horšie energetické rozlíšenie hadrónového kalorimetra.

## 2.3 Nekompensovateľnosť hadrónového kalorimetra

Odozvu detektora  $R$  na hadrónovú, resp. elektromagnetickú komponenty spršky vytvorenej hadrónom (napríklad nabitým  $\pi^\pm$  mezónom) s energiou  $E$  môžeme parametrizovať

$$R_h = hE_h \quad (2.1)$$

$$R_e = eE_e \quad (2.2)$$

$$R = \pi E_\pi \quad (2.3)$$

kde  $e$ ,  $h$  a  $\pi$  sú koeficienty konverzie danej zložky na signál a  $E_e$ ,  $E_h$ ,  $E_\pi$  sú zodpovedajúce energie. Koeficienty závisia na materiáli kalorimetra a jeho štruktúre. Pretože časť energie hadronovej komponenty sa stráca v podobe väzbovej energie a neutrín, vždy platí

$$e/h > 1. \quad (2.4)$$

Tento fakt sa nazýva nekompensovateľnosť kalorimetra. Rôznymi metódami sa dá skonstruovať kompenzovaný kalorimeter s  $e/h \approx 1$ , patrí medzi ne napríklad pridanie absorbného materiálu ako  $^{238}\text{U}$ , ktorý sa po záchyťe neutrónu štiepi, vyžaruje fotóny a tie nahradia chýbajúcu energiu, alebo použitie simulácií na softvérovú kompenzáciu.

Fluktuácie vytvárajú hlavne  $\pi^0$  mezóny. Tie sa s polčasom  $8,4 \cdot 10^{-17}\text{s}$  (podľa [5]) rozpadajú na dva fotóny (98,8 %) alebo na fotón, elektrón a pozitron (1,2%), ktoré rozvinú elektromagnetickú zložku spršky. Podiel celkovej energie primárnej častice  $E_\pi$  pripadajúcej na  $\pi^0$  mezóny  $f_{\pi^0}$  môžeme podľa [6] vyjadriť ako

$$f_{\pi^0} = \frac{E_\pi}{E_{\pi^0}} = 1 - \left( \frac{E_\pi}{E_0} \right)^{(m-1)} \quad (2.5)$$

prípadne

$$f_{\pi^0} = k \ln \left( \frac{E_\pi}{E_0} \right), \quad (2.6)$$

kde  $E_0 = 1 \text{ GeV}$  je priemerná hodnota potrebná na vytvorenie jedného  $\pi^0$  mezónu a  $m = 0.85$ ,  $k = 0.11$  sú konštanty. Energia elektromagnetickej zložky je teda

$$E_e = f_{\pi^0}(E_\pi)E_\pi. \quad (2.7)$$

Celkovú odozvu detektora vyjadríme ako

$$R = \pi E_\pi = R_e + R_h = e f_{\pi^0} E_\pi + h(1 - f_{\pi^0}) E_\pi, \quad (2.8)$$

z čoho sa dá jednoduchými úpravami prejsť ku vzťahu pre detekovanú časť pôvodnej energie  $\pi^\pm$  mezónu

$$\frac{\pi}{e} = \frac{R/E_\pi}{e} = \frac{e f_{\pi^0} + h(1 - f_{\pi^0})}{e} = \frac{1 + (e/h - 1) f_{\pi^0}}{e/h}. \quad (2.9)$$

V prípade, že  $e/h \neq 1$ , závisí odozva kalorimetra na  $f_{\pi^0}$ , čo spôsobuje nelinearitu závislosti odozvy na primárnej energii častice. Závislosť  $f_{\pi^0}$  navyše fluktuuje, pretože vynik  $\pi^0$  je náhodný proces, a závisí aj na segmentácii kalorimetra.

Simuláciami prechodu  $\pi^\pm$  môžeme určiť hodnoty  $\pi/e$  (zvykne sa udávať  $e/\pi$ ) a  $e/h$  a softvérovo kompenzovať namerané hodnoty.

## 2.4 Parametre kalorimetra

### 2.4.1 Linearita

Linearita popisuje odozvu hadrónového kalorimetra na hadróny. Ako bolo ukázané v predchádzajúcej podkapitole, nameraná energia závisí na pôvodnej energii podľa vzťahu (2.9) a to prostredníctvom funkcie  $f_{\pi^0}$ . Ak vynesieme do grafu závislosť podielu nameranej a pôvodnej energie (teda  $\pi/e$ ) na pôvodnej energii, môžeme z nej s použitím predpisu (2.5) alebo (2.6) pre  $f_{\pi^0}$  určiť faktor  $e/h$ .

Znalosť koeficienta  $e/h$  daného kalorimetra je potrebná pre spätnú rekonštrukciu pôvodnej energie častice.

### 2.4.2 Energetické rozlíšenie

Konečný limit energetického rozlíšenia je určený výkyvmi súvisiacimi s rozvojom spŕšky a technickými a kalibračnými obmedzeniami. Základné javy v spŕške sú nezávislé štatistické procesy, teda aj rozlíšenie vyjadrené ako podiel pôvodnej energie sa zvyšuje so zvyšujúcou sa energiou ako

$$(\sigma/E)_{fluct} = a/\sqrt{E}. \quad (2.10)$$

Ďalší príspevok je spôsobený vplyvom technológií, ktoré sú menej závislé na energii, napríklad šum a je úmerný

$$(\sigma/E)_{tech} = b/E. \quad (2.11)$$

Tretia komponenta zahŕňa kalibračné chyby, nelinearitu fotonásobičov a ostatných detekčných prvkov a je nezávislá na energii

$$(\sigma/E)_{syst} = c, \quad (2.12)$$

kde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  sú konštanty. Práve táto časť stanovuje limit pri vysokých energiách, pretože ostatné príspevky klesajú k nule. Celkové rozlíšenie je odmocnina súčtu kvadrátov jednotlivých komponent

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)_{sum} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{E}\right)_{fluct}^2 + \left(\frac{\sigma}{E}\right)_{tech}^2 + \left(\frac{\sigma}{E}\right)_{syst}^2}, \quad (2.13)$$

používa sa aj zápis

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)_{sum} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c. \quad (2.14)$$

Všetky zaujímavé procesy budú prebiehať pri vysokých energiách, teda na veľkom pozadí. Na správne fungovanie detekčného a analyzačného systému je potrebná okrem dobrého rozlíšenia aj rýchla odozva a schopnosť pracovať pri veľkom zaťažení.

# Kapitola 3

## Vyhodnotenie parametrov detektora TileCal zo simulácií

### 3.1 Programy na simuláciu a analýzu

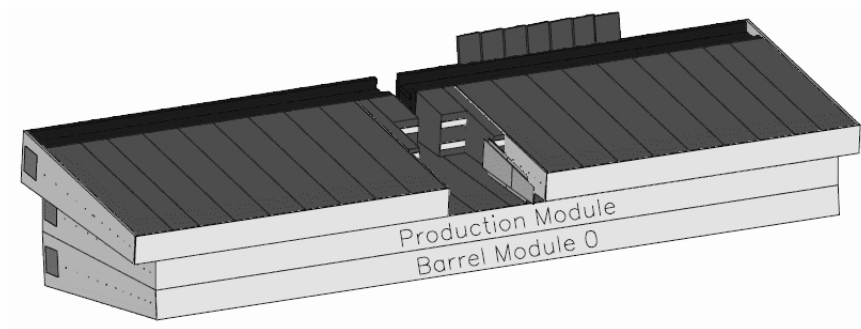
Pre potreby fyziky vysokých energií boli vyvinuté viaceré simulačné programy. Ich vstupnými údajmi sú geometria experimentu a kalorimetra, jeho materiálové zloženie, hybnosť a druh dopadajúcej častice. Trajektória každej častice sa potom rozdelí na malé kroky, v ktorých sa pomocou metódy Monte Carlo a zadaných účinných prierezov rozhoduje, aká interakcia nastane. GEANT je schopný simulovať aj zložité procesy vo viacerých kalorimetroch za sebou a pod.

Pre účely tejto práce boli použité už hotové simulácie vytvorené programom GEANT4, verzia 4.8 s balíčkami QGSP+*Bertini* (podrobnosti na stránkach [7]).

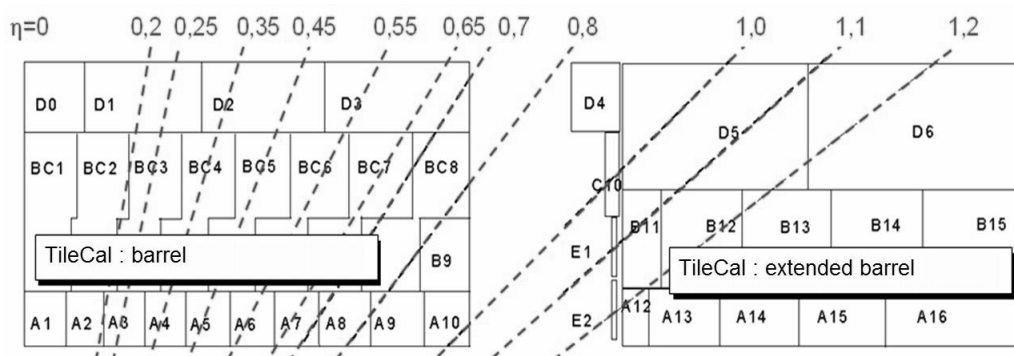
Program ROOT vznikol v CERNe špeciálne na analýzu dát v časticovej fyzike. Ide o objektovo orientovaný software, s mnohými funkciami prispôbenými potrebám fyziky vysokých energií, založený na jazyku C++. Typická dátová štruktúra sa nazýva strom (*tree*) a obsahuje subštruktúry vetvy (*branches*) a listy (*leaves*). V jednotlivých listoch sú zapísané veličiny pre každú nameranú udalosť. Ďalšie informácie a dokumentácia sú dostupné na stránkach programu ([8]).

Na spracovanie dát v tejto práci bola použitá verzia programu ROOT 5.16. Usporiadanie modulov použité v simuláciách je na obrázku 3.1. Zväzok častíc smeroval do stredného modulu s pseudorapiditou  $\eta = 0.35$ , zasiahnuté cely vidno v reze na obrázku 3.2.





**Obrázek 3.1:** Moduly TileCalu použité v simuláciách

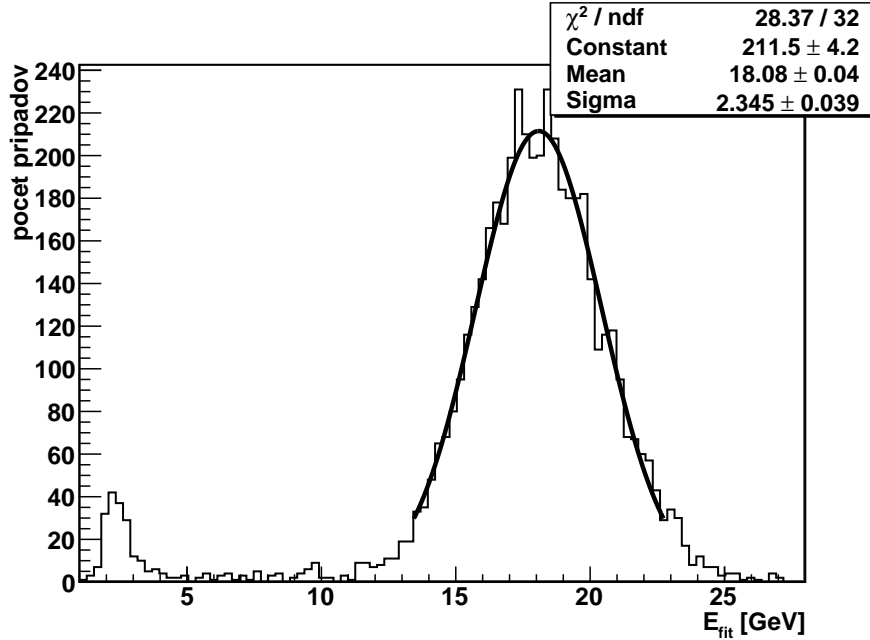


**Obrázek 3.2:** Prierez modulu

## 3.2 Energetické spektrum

Vstupné súbory obsahovali údaje zo simulácií interakcie zväzku nabitých piónov s 3 modulmi hlavného barrelu kalorimetra TileCal (označené C0, C1 a C2) pre energie piónov  $E = 20 \text{ GeV}$ ,  $50 \text{ GeV}$ ,  $100 \text{ GeV}$ ,  $150 \text{ GeV}$  a  $180 \text{ GeV}$ . Pre všetky okrem  $50 \text{ GeV}$  bolo v každom súbore zapísaných 5000 udalostí, v  $50 \text{ GeV}$  bolo 4500 udalostí, pretože súbor sa pravdepodobne počas simulácie poškodil. Premenná *EfitC0* (príp. *EfitC1*, *EfitC2*) obsahovala pole s dĺžkou 48 prvkov, ktoré obsahovalo údaj o energiách nameraných jednotlivými fotonásobičmi (teda energie z 22 cel, ktoré sú v jednej polovici barelu, každá čítaná 2 fotonásobičmi a 45. kanál z cely ktorá zasahuje aj do druhej polovice).

Pomocou programu ROOT som jednotlivé súbory načítala a pre každú udalosť



**Obrázek 3.3:** Spektrum energie deponovanej v troch moduloch kalorimetra pre pôvodnú energiu piónu  $E=20$  GeV

som sčítala energie v jednotlivých celách všetkých troch modulov, výsledné hodnoty  $E_{fit}$  som uložila do iného súboru a zobrazila v histogramoch, pre  $E = 20$  GeV je energetické spektrum zobrazené na obrázku 3.2). V grafe sú uvedené aj výsledky fitu. Hlavný pík som nafitovala iteračne v rozsahu  $\pm 2\sigma$  Gaussovou krivkou, aby som zmenšila vplyv toho, že závislosť nemá na okrajoch presne tento tvar.

Ďalšou možnosťou vyhonotenia je sčítanie energie uvoľnenej len v bunke, do ktorej mieril zväzok a jej susedných bunkách vo všetkých troch moduloch (energiu označím  $E_{fit3x3}$ ). Pre porovnanie oboch metód sú výsledky fitov zobrazené v tabuľke 3.2, stredná hodnota fitu energie z celého kalorimetra je označená  $E_{mean}$  a  $E_{mean3x3}$  pre metódu  $3x3$ . Výhodou druhého postupu je, že sa zníži vplyv šumu v reálnom experimente, pričom výsledná hodnota energie sa ovplyvní minimálne. Z tohoto dôvodu budem ďalej používať hodnoty získané týmto postupom.

Z histogramu je zjavné, že rozvoj hadrónových spříšiek je zložitý a deponovaná energia má široký rozsah hodnôt. Menší pík v okolí 2,5 GeV je spôsobený miónmi, čo bude diskutované v nasledujúcej podkapitole.

$E[\text{GeV}]$	$E_{mean}[\text{GeV}]$	$\sigma[\text{GeV}]$	$E_{mean3x3}[\text{GeV}]$	$\sigma_{3x3}[\text{GeV}]$
20	$18,08 \pm 0,04$	$2,35 \pm 0,04$	$18,01 \pm 0,04$	$2,34 \pm 0,04$
50	$47,44 \pm 0,08$	$4,51 \pm 0,08$	$47,35 \pm 0,08$	$4,48 \pm 0,08$
100	$96,3 \pm 0,1$	$7,4 \pm 0,1$	$96,0 \pm 0,1$	$7,5 \pm 0,1$
150	$145,1 \pm 0,2$	$10,2 \pm 0,2$	$144,7 \pm 0,2$	$10,3 \pm 0,2$
180	$174,7 \pm 0,2$	$11,7 \pm 0,2$	$174,2 \pm 0,2$	$11,9 \pm 0,2$

**Tabulka 3.1:** Porovnanie parametrov  $E_{mean}$  a  $\sigma$  získaných sčítaním energie v celom kalorimetri a 3x3 veži pre rôzne hodnoty počiatočnej energie  $E$

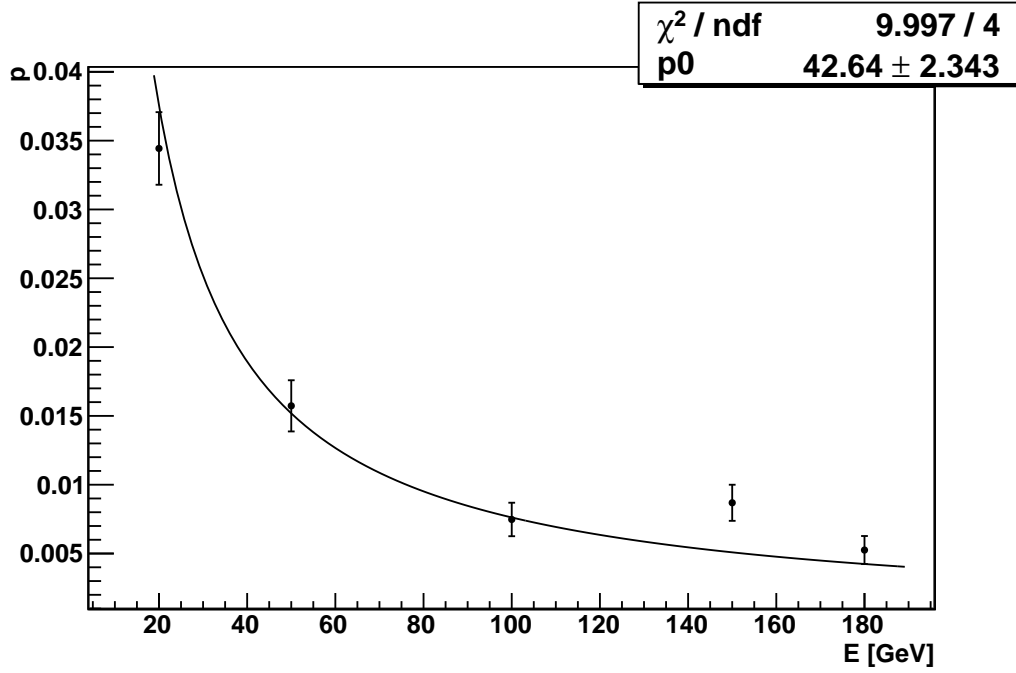
### 3.2.1 Mióny

V energetickom spektre na obrázku 3.2 je viditeľný menší pík v oblasti energie okolo 2,5 GeV. Prvým predpokladom bolo, že ide o mióny, na ktoré sa v 99,98% prípadov rozpadajú pióny (zároveň vzniká neutríno, príp. antineutríno). Zo zdrojových súborov som teda vybrala len tie prípady, v ktorých

- energia  $E_{fit3x3}$  bola menšia ako 4,5 GeV a zároveň väčšia ako 0,1 GeV. Hornú medzu som určila skúšaním jej vplyvu na počet prípadov vo vybranom rozsahu, pre väčšie hodnoty sa počet prípadov takmer nemení (napr. 7,5 GeV zvýši ich počet maximálne o 3 zo 190 v prípade  $E = 20$  GeV), dolná hranica zabezpečí vylúčenie prípadov, v ktorých na detektor nedopadla žiadna častica<sup>1</sup>.
- energia nameraná v jednotlivých bunkách v smere zväzku ohraničená zdola hodnotou 0,1 GeV a zhora 1,5 GeV, 3 GeV a 1,5 GeV, čo približne zodpovedá pomeru ich dĺžok, pretože mióny nevytvárajú spŕšku, ale približne rovnomerne strácajú energiu ionizáciou materiálu.
- súčet energie v celách veže 3x3, bola menšia ako 0,2 GeV, čo vylúči prípady, kedy sa spŕška z piónu veľmi rýchlo rozvinie do šírky.

<sup>1</sup>Aj keď je rozpad piónu na mión je v ťažiskovej sústave izotropný a mión vylieta približne s hybnosťou 30 MeV/c, z kinematiky rozpadu sa dá vypočítať, že aj pri energii  $E = 20$  GeV je odklon miónu menší ako  $2 \cdot 10^{-3}$  rad, mión teda zasiahne kalorimeter v závislosti na jeho vzdialenosti od zdroja. Udalosti s  $E_{fit3x3}$  menšou ako 0,1 GeV som teda odpočítala aj z celkového počtu piónov, takže tieto prípady vôbec neuvažujem.

Ďalším javom, ktorý by mohol nastať je, že pión by nerozvinul spršku, pričom by dal rovnaký signál ako mión. Podľa [10] má TileCal dĺžku  $7,4\lambda_I$  pre protóny, pre pseudorapiditu  $\eta = 0.35$  to predstavuje  $7,6\lambda_I$  a po uvážení pomeru interakčných dĺžok protónu a piónu ( $1/1,22$ ) má kalorimeter pre pión dĺžku  $6,3\lambda_I$ . Pravdepodobnosť interakcie piónu až na konci kalorimetra je asi 0,1%, čo je zanedbateľné.



**Obrázek 3.4:** Pravdepodobnosť rozpadu piónu na mión pred vstupom do detektora v závislosti na energii piónu

Takto získaný počet udalostí som podelila celkovým počtom piónov, chybu som určila ako jej odmocninu, pretože rozpady piónov sú štatisticky nezávislé javy a riadia sa Poissonovým rozdelením. Získala som pravdepodobnosť rozpadu piónu  $p$  a vyniesla ju do grafu 3.2.1, ktorým som preložila krivku odpovedajúcu rozpadovému zákonu, po úpravách

$$p = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{L}{\beta\gamma c\tau}\right), \quad (3.1)$$

kde  $\tau$  je doba života piónu,  $L$  vzdialenosť zdroja zväzku od modulu,  $c$  rýchlosť svetla,  $\beta$  a  $\gamma$  relativistické faktory závislé na  $E$  a hmotnosti piónu. Ako voľný para-

meter  $p_0$  som vzala vzdialenosť  $L$ , hodnotu  $c\tau_{tab}$  podľa [5]  $c\tau_{tab} = 7,8045$  m. Dráha častíc určená fitom je  $L = (42,6 \pm 2)$  m. Simulácie boli prevedené v konfigurácii so vzdialenosťou zdroja a kalorimetra cca 42 m.

### 3.3 Parametre kalorimetra

#### 3.3.1 Linearita

V grafe na obrázku 3.5 je vynesená linearita detektora, na osi  $x$  je počiatočná energia častice  $E$ , na osi  $y$  pomer nameranej energie ku počiatočnej, čo zodpovedá veličine  $\pi/e$ . Ďalej je tam zakreslená závislosť (2.9) pre experimentálne určenú hodnotu  $e/h = 1,36$  ([9]) s použitím (2.6) pre  $f_{\pi^0}$ .

Priebeh hodnôt určených zo simulácií približne odpovedá experimentálne určenej krivke. Odchýlka je spôsobená tým, že hodnota  $e/h = 1,36$  pochádza z odlišného experimentálneho usporiadania ako v simuláciách (viď [6]). Je potrebné brať do úvahy to, že v rámci rozsahu hodnôt linearity (0 až 1) sú experimentálne dáta blízke simulácii.

#### 3.3.2 Energetické rozlíšenie

Na obrázku 3.6 je graf závislosti rozlíšenia  $\sigma/E_{mean3x3}$  na počiatočnej energii častice  $E$ . Závislosť som fitovala funkciou

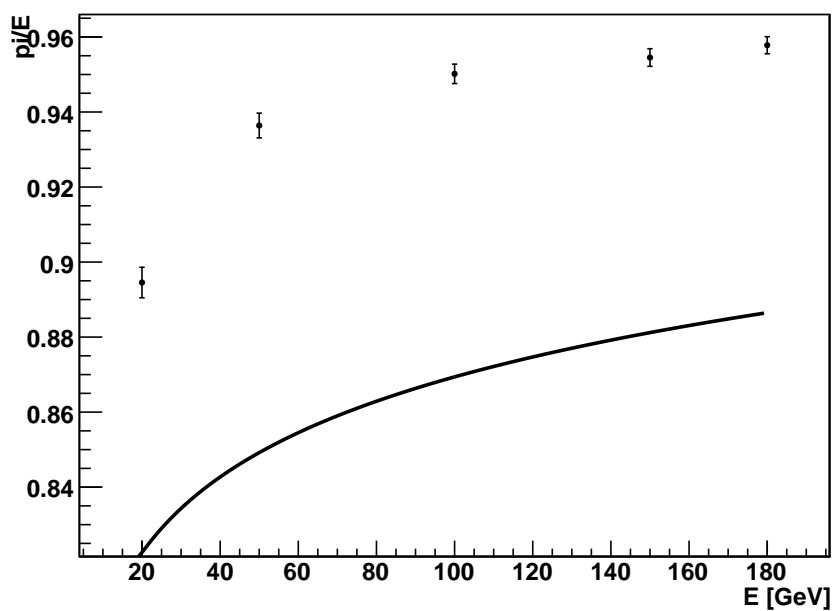
$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)_{sum} = \frac{p_0}{\sqrt{E}} \oplus p_1, \quad (3.2)$$

ktorá vychádza zo vzťahu 2.14, no zanedbáva člen popisujúci šum a pod. (úmerný  $1/E$ ). Získané hodnoty

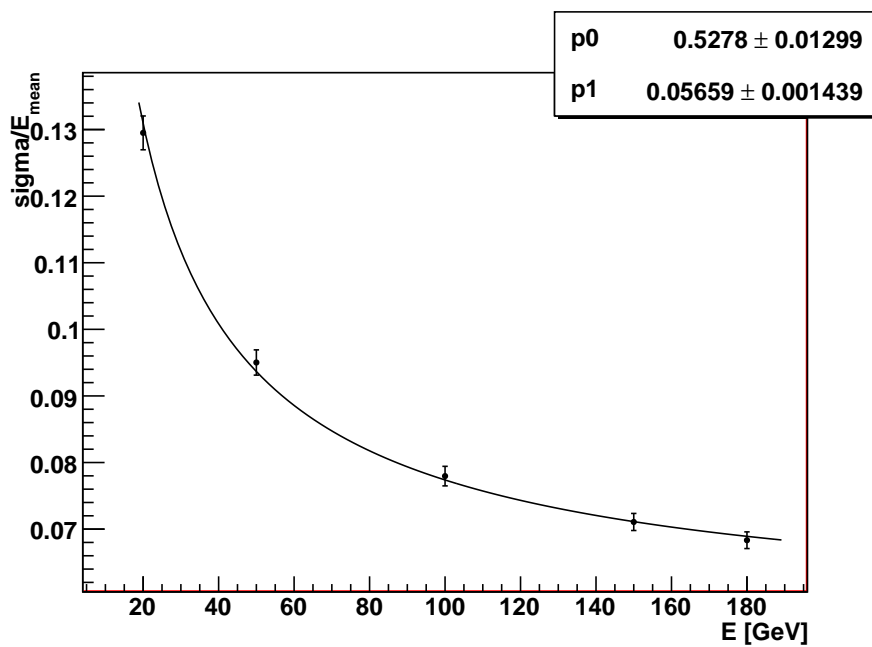
$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)_{sum} = \frac{(52,6 \pm 1,2)\%}{\sqrt{E}} \oplus (5,5 \pm 0,1)\%, \quad (3.3)$$

veľmi dobre zodpovedajú experimentálne zisteným ([11])

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)_{sum} = \frac{(56,5 \pm 0,6)\%}{\sqrt{E}} \oplus (5,1 \pm 0,1)\%. \quad (3.4)$$



**Obrázek 3.5:** Linearita detektora, body predstavujú hodnoty určené zo simulácií, krivka závislosť určenú experimentálne (v odlišnej konfigurácii, len pre porovnanie priebehu.)



**Obrázek 3.6:** Závislosť rozlíšenia  $\sigma/E_{\text{mean}3x3}$  na energii častice

# Záver

V úvode práce bol stručne predstavený experiment ATLAS na urýchľovači LHC v CERNe s dôrazom na hadronový kalorimeter TileCal a jeho stavbu.

V ďalšej kapitole bola popísaná interakcia častíc v kalorimetroch, priblížený problém nekompenzovateľnosti hadrónových kalorimetrov, jeho vplyv na meranie energie častíc a dva z parametrov kalorimetrov, linearita a energetické rozlíšenie.

V poslednej časti boli tieto parametre pomocou programu ROOT vyhodnotené z hotových simulácií interakcií piónov s tromi modulmi kalorimetra. Získané výsledky sú v dobrej zhode s experimentálnymi údajmi na prototypoch TileCalu.

# Literatúra

- [1] *ATLAS Collaboration*, CERN [online]. [cit. 6.5.2008]. Dostupné na: <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/>
- [2] *CERN - European Organization for Nuclear Research*, CERN [online]. [cit. 6.5.2008]. Dostupné na: <http://public.web.cern.ch/public/>
- [3] ATLAS Collaboration: *ATLAS Letter of Intent for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN-ATLAS*, Geneva: CERN, 1992.
- [4] ATLAS Collaboration: *The ATLAS detector physics performance*, Technical Design Report, Vol.II, Geneva: CERN, 1999.
- [5] Alvaréz-Gaume L. at al.: *Mezon sumary table*. Phys. Lett. B, 2004, vol 592 , i. 1, p. 38- 64.
- [6] Kulchitsky Y. A., Kuzmin M. V., Vinogradov V. B.: *Non-Compensation of an Electromagnetic Comparment of a Combined Calorimeter*, ATL-TILECAL-99-021, submitted on 23rd of November 1999 [cit. 6.5.2008]. Dostupné na: <http://arxiv.org/abs/hep-ex/9911033v1>
- [7] *Geant4: A toolkit for the simulation of the passage of particles through matter*, CERN [online]. [cit. 6.5.2008]. Dostupné na [www: http://geant4.web.cern.ch/geant4/](http://geant4.web.cern.ch/geant4/)
- [8] *The ROOT System Home Page*, CERN [online]. [cit. 6.5.2008]. Dostupné na: <http://root.cern.ch/>



- [9] Budagov J.A., Kulchitsky Y.A., Kuzmin M.V., Vinogradov V.B.: *The  $e/h$  ratio of the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter* [online], ATL- TILECAL-2001-001, last revision 22nd of May 2001 [cit. 6.5.2008]. Dostupné na: <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0104046v1>
  
- [10] Krivkova, P. ; Leitner, R. : *Measurement of the interaction length of pions and protons in the TileCal Module 0* , ATL-TILECAL-99-007, Geneva : CERN, 15 March 1999. .
  
- [11] Henriques A. *Summary of pion reanalysis with new ntuples*, [cit. 26.5.2008]. Dostupné na:  
<http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=3resId=1materialId=slidesconfId=31110> >